

燃煤电厂湿法脱硫废水中砷的脱除技术研究进展

陈玉强, 孙晨皓, 王美琪, 张胜寒*

(华北电力大学(保定)环境科学与工程学院, 河北保定 071000)

摘要:基于近几年国内外关于砷脱除研究文献, 简要综述氧化法、沉淀法、吸附法、生物处理法在废水除砷中的应用。针对国内燃煤电厂脱硫废水处理现有的工艺条件, 总结了砷在整个废水处理流程中的脱除方式, 并对存在的不足提出几点建议。

关键词: 脱硫废水; 砷; 脱除技术

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)01-0069-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.01.016

Research progress of arsenic removal technologies of wet flue gas desulfurization wastewater from coal-fired power plants

CHEN Yu-qiang, SUN Chen-hao, WANG Mei-qi, ZHANG Sheng-han*

(College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University(Baoding), Baoding 071000, China)

Abstract: Based on the research literature in the past few years at home and abroad, the applications of the oxidation method, precipitation method, adsorption method, and biological treatment in the arsenic removal from wastewater are reviewed. The existing process conditions of desulfurization wastewater treatment in coal-fired power plant are discussed. The arsenic removal methods in the whole wastewater treatment process are summarized. Some suggestions about improvement of the arsenic removal rate are put forward as well.

Key words: desulphurization wastewater; arsenic; removal technologies

砷是当前环境中对人类致癌最普遍、危害性最大的物质之一, 具有毒性的砷能极大破坏人体机能, 并且属于没有阈值的致癌物^[1]。中国是受砷中毒危害最为严重的国家之一, 砷污染对水体、土壤、大气等自然环境造成巨大影响。国内现行燃煤机组脱硫设备对砷去除率低, 大部分砷会在石膏中富集, 脱硫废水中仍残留部分未除去的砷, 处理难度大。目前, 我国燃煤电厂废水排放标准对砷的排放限值是 0.5 mg/L, 2015 年美国环保署发布的最新修订执行的蒸汽发电电厂脱硫废水中砷的排放限值为 4.0 μg/L, 仅为国内标准的 1%, 对脱硫废水中的砷的脱除提出了更高的要求^[2]。因此如何经济高效地去除脱硫废水中的砷, 进一步降低砷的排放以及做到零污染排放引起业界关注。中国以煤炭为主的能源结构在相当长时间内不会发生实质性改变, 国内燃煤电厂正在如火如荼地大力推行烟气污染物“超低排放”政策, 同时《水污染行动计划》的颁布表明国家对各类水质污染治理力度的加强, 因此对脱

硫废水中砷排放控制十分迫切。

1 废水中脱砷常用方法

1.1 氧化法

研究表明, 3 价砷的毒性比 5 价砷高出 60 倍, 很多试剂对 3 价砷的去除作用较差, 但对 5 价砷的脱除效果要好得多^[3]。因此通常会设置预氧化装置将 3 价砷转化为 5 价砷, 继而进行后续处理。

为避免氧化过程后氧化剂残留或产生有害副产物, 氧成为除砷首选氧化剂, 但由于溶解氧的氧化动力学缓慢, 需要寻找合适的催化剂加速反应。现行燃煤电厂废水处理多使用曝气池处理, 同时可降低脱硫废水中因还原态无机物引起的高 COD 值。熊鹏等^[4]进行了空气氧化 As(III) 相关氧化动力学实验, 结果表明, pH 对曝气氧化水中的砷无明显影响, 而光照对砷的氧化起到了重要的作用。在太阳光的照射下, TiO₂ 等催化剂可以吸收光能并以一定波长释放, 将水中溶解氧离子化, 以自由基形式对砷进行

收稿日期: 2016-06-05; 修回日期: 2016-12-08

作者简介: 陈玉强(1994-), 男, 硕士生; 张胜寒(1962-), 男, 教授, 主要研究方向是金属腐蚀与防护, 通讯联系人, 0312-7525519, zhang-shenghan@163.com。

氧化转化。氧气可以吸收紫外线能量形成臭氧,李多松等^[5]利用紫外线照射分解臭氧产生的活性氧促进 As(Ⅲ)的氧化,同时向体系中加入 H₂O₂,两者发生快速协同氧化作用,大大缩短了氧化时间。

氧化法除砷是一种行之有效的辅助方法,但存在成本高、工序烦琐等缺点,于是有人提出在光催化

表 1 常见砷氧化方法优缺点

| 氧化类型 | 常见方法 | 优点 | 缺点 |
|------|--|--|--|
| 直接氧化 | 游离氯/ 氯氧化物 | 氧化速率快,效果明显,氧化率基本达到 100% | 引入更多的 Cl ⁻ ; 氧化剂有毒,保存困难,易出现问题 |
| | 锰氧化物 | 氧化效果好,对其他还原性成分也存在强氧化作用 | 价格贵,运行成本高;氧化剂易残留,带入杂质 |
| | 空气 | 氧化成本低廉,工艺简单,可用于原位氧化,对系统无负面影响 | 氧化速率缓慢,直接应用处理效果不明显 |
| 高级氧化 | H ₂ O ₂ -Fe (Fenton 试剂) | 对 3 价砷具有强氧化性,降低毒性,同时与水中氮氧化物、金属配合物等发生氧化作用 | 工程应用技术不成熟,需要调节 pH,现场管理要求较高,对水质稳定性要求高 |
| | 光催化氧化 | 氧化效率高,对系统无负面影响;适于原位氧化系统;低残余量 | 氧化剂制备要求高,工艺复杂;工业应用上材料需求量大,失效后后期回收和处理困难 |
| 联合技术 | 光催化-吸附 | 氧化吸附一体化,节约设备占地,简化处理流程,提高脱硫效率 | 材料制备工艺复杂,工艺参数缺失,处理能力有待提高 |

氧化体系中同时加入吸附剂进行除砷,同步完成 As(Ⅲ)的氧化和 As(V)的吸附去除,避免吸附剂制备过程中复杂的固液分离和干燥操作。王彦琪等^[6]设计合成的铁掺杂的钛酸纳米管(Fe-TNTs)在光催化 30 min 过程中即可将 As(Ⅲ)完全氧化成 As(V),As(V)继而可通过 Fe-TNTs 的静电引力作用吸附被同步去除,同时 As(Ⅲ)通过配位作用被 Fe-TNTs 吸附去除,简化处理流程。表 1^[4-8]对水中砷处理过程常见氧化方法的优缺点进行了比较总结。

1.2 沉淀絮凝法

沉淀法是利用可溶性砷可与某些离子形成难溶化合物的特性,通过向废水中加入沉淀剂除去溶液中砷的方法,是一项水污染处理应用广泛的传统工艺^[7]。主要包括石灰软化法、铁氧体法、铝盐法、硫化法等。国内第一类污染物砷排放允许值为 0.5 mg/L,相比国外标准要求偏低,具有经济效益高、工艺简单、效率较高等优势的钙沉淀法是不二选择,同时对脱硫废水中铬、铜、汞、锌以及其他金属离子也有一定的去除能力,残余浓度处于中等水平,但在高 pH 条件下两性金属氢氧化物的反溶现象,因此操作必须调节 pH 至最佳范围。

实践证实,以铁盐为基础的除砷方法是现行废水砷处理最合理有效的办法,工业上常使用铁系沉淀絮凝剂^[8]。铁盐尤其是 3 价铁可以与 As(V)形成溶度积极小的砷酸铁沉淀,同时在合适 pH 条件下会生成大量的 Fe-OH 胶体,如氢氧化亚铁、氢氧化铁以及其他形态的各种单核或多核离子态配合物,它们通过压缩双电层、电性中和、吸附架桥、絮体网捕卷扫等作用机理与生成的砷酸铁颗粒物之间发

(上接第 68 页)

[24] Gutiérrez O Y, Valencia D, Fuentes G A, *et al.* Mo and NiMo catalysts supported on SBA-15 modified by grafted ZrO₂ species: Synthesis, characterization and evaluation in 4,6-dimethyldibenzothiophene hydrodesulfurization [J]. *Journal of Catalysis*, 2007, 249 (2): 140 - 153.

[25] Gutiérrez O Y, Klimova T. Effect of the support on the high activity of the (Ni) Mo/ZrO₂-SBA-15 catalyst in the simultaneous hydrodesulfurization of DBT and 4,6-DMDBT [J]. *Journal of Catalysis*, 2011, 281 (1): 50 - 62.

[26] Valencia D, Klimova T. Effect of the support composition on the characteristics of NiMo and CoMo/(Zr)SBA-15 catalysts and their performance in deep hydrodesulfurization [J]. *Catalysis Today*,

2011, 166 (1): 91 - 101.

[27] Klimova T, Peña L, Lizama L, *et al.* Modification of activity and selectivity of NiMo/SBA-15 HDS catalysts by grafting of different metal oxides on the support surface [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48 (3): 1126 - 1133.

[28] Klimova T, Gutiérrez O, Lizama L, *et al.* Advantages of ZrO₂- and TiO₂-SBA-15 mesostructured supports for hydrodesulfurization catalysts over pure TiO₂, ZrO₂, and SBA-15 [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2010, 133 (1/2/3): 91 - 99.

[29] 王敬伟. 硅烷化改性 MCM-41 负载的 Pd 催化剂加氢脱硫性能 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

[30] Parola V L, Dragoi B, Ungureanu A, *et al.* New HDS catalysts based on thiol functionalized mesoporous silica supports [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2010, 386 (1/2): 43 - 50. ■

生共沉淀,从而有效提高除砷效能。实践表明,pH对 FeCl_3 絮凝除砷效果影响最为显著,有人提出2种作用机制:在 $\text{pH} = 3.0 \sim 9.5$, $\text{As}(\text{V})$ 主要以双齿双核方式吸附在氢氧化铁上; $\text{pH} > 9.5$ 时, $\text{As}(\text{V})$ 主要与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 形成沉淀而被去除^[9]。刘辉利等^[10]则认为在中性偏酸条件下吸附效果最好,中性和酸性条件下 $\text{As}(\text{V})$ 可能是以双配位表面络合的质子化的 $\text{FeO}_2\text{As}(\text{O})(\text{OH})^-$ 和非质子化的 $\text{FeO}_2\text{As}(\text{O})^{2-}$ 形态存在于氢氧化铁表面,发生表面沉淀和化学吸附作用。

表2为常见絮凝沉淀方法的优缺点对比。

表2 常见沉淀絮凝方法优缺点

| 絮凝方式 | 优点 | 缺点 |
|------------------------|--|--|
| 铝盐 ^[11] | 磷酸铝溶解度低,铝盐絮凝剂易得、量大;相对成本低,流程简易;适用pH范围较广 | 产生有害污泥;需预氧化;pH影响混凝过程铝形态分布,除砷效能与 Al_3 形态含量呈正相关,效率相对较低 |
| 铁盐 ^[12-13] | 应用范围广,工业实践案例多;絮凝剂容易获得;除砷效率较铝盐高 | 对3价砷去除能力中等;需要固液分离 |
| 钛盐 ^[14] | 絮体生长速度快,结构密实,性能优良;在弱碱性条件下除砷效果较好,除砷效果远优于 $\text{Fe}(\text{III})$ 和 $\text{Ti}(\text{IV})$ | 共存阴离子 HCO_3^- 、 SiO_3^{2-} 和 H_2PO_4^- 对除砷率抑制作用明显,需要调节pH |
| 石灰 ^[15] | 易得、量大价格低廉,去除效果中等;已在多种废水处理中应用,可显著去除其他金属离子等 | 需要调节合适pH范围,溶解度低导致石灰添加量偏大,污泥产生量和体积偏大 |
| 电絮凝 ^[16-17] | 除砷效能良好,避免大量污泥产生,不会造成二次污染 | 管理要求高,消耗电能,需要安装新装置;对水质稳定性要求高 |

混凝沉淀脱砷最大的弊端在于会产生大量废弃污泥,而且污泥中有害物质含量较高,后期处理困难,甚至重金属含量高的污泥需要以高危固废形式特殊固化填埋。由于部分沉淀物的不稳定性,容易出现污染物浸出,造成二次污染。电絮凝作为一种低消耗、无残留物、效率高的除砷方法被提出,胡维等^[16]在反应时间9.91 min、电流0.31 A、溶液初始pH为6.94、初始 $\text{As}(\text{III})$ 浓度19.89 mg/L的条件下进行除砷实验, $\text{As}(\text{III})$ 的实测去除率达98.8%,出水 $\text{As}(\text{III})$ 低至0.24 mg/L,达到GB 8978—1996排放要求。包头华鼎铜业发展有限公司铜冶炼烟气制酸酸性污水中含砷量高,采用铁盐中和沉降、过滤、

电絮凝、物理吸附联合除砷除杂后,得到的洁净水砷浓度0.3 mg/L,其他指标均达GB 25467—2010标准^[17]。电絮凝和其他技术联合工艺可以有效达到污泥减量化,解决污泥固体废弃物的后期难处理问题,同时也强化了除砷效果。

1.3 吸附法

吸附法具有去除效率高,稳定性好,不产生或很少产生二次污染,可重复使用等优点,在饮用水和工业废水砷处理中备受青睐^[18]。常用吸附剂有矿物质、活性炭、活性氧化铝、金属(氢)氧化物、纳米材料、载铁复合材料、生物吸附剂等,目前研究人员重点方向在吸附剂改性强化,以负载方式结合多种除砷机理达到良好吸附效果。

铁、铁盐及相关铁氧化物对砷具有很强的选择性配位能力,有关零价铁、铁屑、铁盐、水和氧化铁(GFO)、羟基氧化铁、磁性铁等吸附除砷的研究均有报道^[19-20],但实际应用时由于这些物质颗粒细小,易造成堵塞流失,水头损失大,直接工业化应用比较困难。为解决这一问题,研究人员尝试将其固载到多孔固相负载体表面制备成复合型载铁环境材料,固相负载体选择有活性炭、矿物质、腐植酸、新碳基材料等,其中介孔材料作为载体是热门研究方向,同时将吸附剂以纳米形式负载,可进一步提升吸附能力。工业上常使用活性炭作为固相载体,便于回收纳米材料,节约成本。

由于树脂中含有多种活性基团,如羟基、羧基、氨基等,这些活性基团能够快速螯合砷、汞等,高效去除重金属离子,而且吸附产物可脱附纯化,进而回收重金属。树脂有快速改善水质且处理量大的能力,李福勤等^[21]以强碱性大孔型阴离子交换树脂D201负载 $\text{Fe}(\text{III})$ 制备的纳米吸附材料对 $\text{As}(\text{III})$ 的最大静态吸附容量达43 mg/g,王世阳等^[22]制备的负载锆的树脂D201对 $\text{As}(\text{V})$ 最大吸附量达83.24 mg/g,且废水中的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 对D201- $\text{Fe}(\text{III})$ 和D201-Zr的砷吸附能力影响较小,这对于高氯高硫酸根的脱硫废水处理有着一定的借鉴作用,且树脂洗脱再生后可多次使用,吸附能力未有下降。

水滑石属阴离子黏土,是一类由带正电荷的物层和层间填充负电荷的阴离子所构成的层状化合物,又称层状双金属氢氧化物,由于其具有较大的内表面积,容易接受客体水分子,有很强的吸附能力,且具有层间阴离子交换性,可作为可渗透反应墙(PRB)等水污染原位处理装置的填充材料,用于处

理 $B(OH)_4^-$ 、 SeO_4^{2-} 、 CrO_4^{2-} 、 AsO_4^{3-} 、 MoO_4^{2-} 等重金属离子的实验研究。郭亚祺等^[23]共沉淀合成的纳米镁铝类水滑石煅烧后具有良好的共除砷氟性能,对砷最大吸附量为 51.02 mg/g,氟最大吸附量为 36.63 mg/g,材料再生循环利用 4 次后吸附效率依旧达到 90% 以上,Duan 等^[24]指出煅烧水滑石对砷的去除主要是通过层状结构重建过程中的表面吸附和离子交换作用,吸附动力学受到表面反应和扩散控制。另外发现钛改性水滑石在光催化条件下可在 20 min 内脱砷率达 95%,脱砷效率优秀,具有良好的应用前景。生物体具有特定的化学结构,其中的某些特殊结构对砷转化固定具有促进作用。近年来,众多研究者尝试多种微生物(如植物残体、细菌、真菌以及藻类)改性处理加工制备生物吸附剂来处理重金属污染废水。

1.4 生物处理法

生物法是处理复杂工业废水的一种环境友好型方法,鉴于物理和化学法脱砷费用高、易产生二次污染等缺点,生物法处理含砷废水有着广阔的应用前景。常用方法有生物膜、活性污泥、生物吸附剂、人工湿地等工艺。

活性污泥法可通过泥中复杂微生物对废水中砷进行固定转化,使砷降解脱毒。活性污泥适合处理低浓度砷,去除率较高,吸附平衡时间较短,具有一定的工业应用潜力,但该方法运行效果受限于微生物活性,容易被砷浓度和价态、有机负荷、pH 和污泥状态等干扰。生物膜反应器是利用无氧微生物对特定重金属污染物的高靶向性去除能力,以生物膜为基层构建处理装置,可以有效地同时去除砷、汞、硒等重金属物质,且反洗周期长,再使用效率好,是未来废水处理的有力措施^[25]。利用乙醇增强还原反应器处理模拟中碱性矿井废水中的砷和硒,发现反应器在中性条件下处理效果较好;加入 $FeCl_2$ 会生成 FeS ,其对砷化物的吸附作用可以有效强化砷脱除效果^[26]。而 Altun 等^[27]认为反应器沉淀物中以 As_2S_3 为主,共沉淀物有 FeS 、 FeS_2 和 $FeAsS$,认为是 $FeAsS$ 的形成取代了 As_2S_3 ,进而提高了砷脱除率。

人工湿地作为工业化程度较高、经济简易、对水力负荷有一定缓冲能力的处理工艺,通过选取对于特定重金属有超富集作用的植物对废水中重金属进行吸收浓缩,达到净化目的。研究人员利用蜈蚣草超富集砷特征进行湿地系统除砷,发现蜈蚣草具有耐高砷能力,砷形态会影响植物体内砷存在类型, HCO_3^- 对砷的吸收有着明显的抑制作用。该方法受

限于富集植物的活性,容易受到砷浓度、温度、氨氮化物、填料类型等影响。填料类型繁多,研究表明,锰砂除砷能力大于陶粒、沸石和砾石,最大吸附容量达到 36.62 mg/kg^[28]。吴敏等^[29]通过组合不同基质和植物组成湿地系统,发现灯芯草富集砷能力优于蜈蚣草,除砷率与温度和 NH_4^+-N 质量浓度呈显著正相关性,与 $PO_4^{3-}-P$ 质量浓度呈显著负相关关系。Pedescoll 等^[30]认为可通过硫化絮凝-沉淀机制增强人工湿地对污染物的去除效率。生物处理法具备同步去除多种污染物、环保绿色的特性,在国外电厂废水处理中已有运行案例,但国内存在相关生物处理机制研究不足、具体运行参数缺失、装置设备建设缺乏经验、有毒物质生物累积性评估等问题,使得该法目前得不到广泛推广。

2 燃煤电厂湿法脱硫废水除砷工艺概述

现行国内 WFGD 脱硫废水的处理多是设立一套单独系统进行,使用化学沉淀絮凝工艺,即氧化处理—石灰乳中和—沉淀絮凝—沉降澄清—污泥处理过程,如图 1 所示,该工艺因具备技术成熟、设备简单适合、处理成本低、操作简单等优点被广泛应用且行之有效。目前对脱硫废水处理技术研究主要包括物化沉淀法、生物处理法、高温烟道蒸发、蒸发浓缩结晶等,其中生物处置法或高温蒸发等深度处理技术运行成本高昂,部分技术研究应用不成熟,可能会影响电厂的正常运行。在目前国内现行脱硫废水排放标准以及能源结构的条件下,国内电厂普遍采用物理化学沉淀法对脱硫废水进行单独处理的模式。

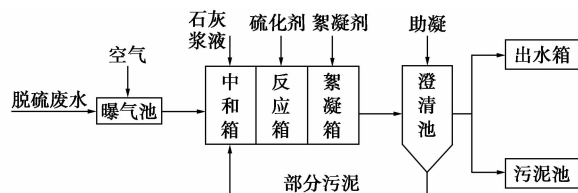


图 1 国内湿法脱硫废水常规处理工艺流程图

在上述处理流程中,废水中 $As(III)$ 首先在曝气池中被空气氧化为 $As(V)$,为后续砷的有效去除做好准备。石灰浆液作为钙沉淀剂对低浓度含砷废水有着较高的去除率,实验室试验表明,在最佳条件下石灰沉淀除砷的效率可达到 99.05%,同时石灰浆液可以与废水中高浓度 F^- 直接反应生成 CaF_2 沉淀脱氟,与部分金属离子形成氢氧化物沉淀,对废水中杂质有着一定的絮凝作用。为有效去除 Hg^{2+} 、

Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等残余重金属离子,常用方法是向系统中加入硫化剂,如 Na_2S 、 H_2S 等无机物,或 TMT、DTCR 等含有大量极性基的螯合剂,硫化剂会捕捉废水中的砷生成 As_2S_3 、 As_2S_5 等难溶物从而进一步增强除砷效果。电厂中使用的絮凝剂多选择氯化铁、硫酸亚铁、硫酸氯铁、硫酸铝等,如铁系混凝剂在一定条件下会水解生成氢氧化铁,与废水中的可溶性砷形成砷酸铁等难溶性沉淀物,此外由于硫化物沉淀结晶比较细小,难以沉降,氢氧化铁会将水中的砷化物以物理吸附(静电引力)和化学吸附(化学键)的方式吸附到其表面,发生吸附共沉淀作用,提高除砷效率。另外适当添加高分子助凝剂(如聚丙烯酰胺 PAM, PAM 具有水溶性高分子长链线结构),可在距离较远的微小沉淀物颗粒之间形成聚合物桥并逐渐增大,絮体网捕卷扫最终形成大絮凝体而快速沉降,大大强化处理效果。砷在现有脱硫废水物化处理过程中的转化去除过程见图 2。目前国内湿法脱硫废水物化处理后砷浓度一般都可以达到排放允许值,但一方面达标出水回用后残留砷会继续在系统中循环富集,易造成砷浓度超标;另一方面产生的大量污泥存在不稳定性,污泥中部分砷化物会在适合条件下分解释放,对环境造成不可估计的损失。

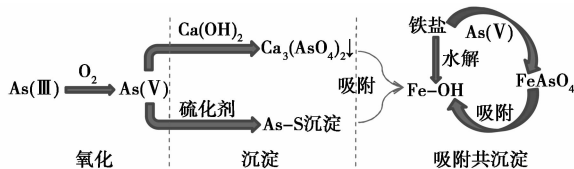


图2 砷在整个脱硫废水处理系统中的转化去除过程

随着国内“十三五”期间对环境保护力度加强,燃煤电厂作为传统的污染大户首当其冲。2015年12月2日,国务院总理李克强召开国务院常务会议,决定全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造,大幅度降低发电煤耗和污染排放,争取在2020年之前全面达成超低排放。目前国内超低排放规定的部分污染控制指标与美国、日本、欧盟等发达国家不相上下,甚至更严格。可以预见,在不久的将来,对电厂脱硫废水中砷等污染物的排放限值也将达到与美国等国家同样严格的要求。因此,研究开发脱除效果更高的经济可行的脱硫废水脱砷技术是将来的热门研究方向。脱硫废水作为燃煤电厂复杂废弃水体,污染物种类繁多,处理难度大,要做到超低排放、深度节水就必须经济有效地加强对脱硫废水中砷及其

他重金属的污染控制。

3 结语

通过阅读近几年大量文献,论述了氧化法、沉淀絮凝法、吸附法和生物处理法等技术 in 废水除砷中的应用。国内现行的物理化学方式湿法脱硫废水处理工艺处理后砷浓度基本可以达到国家排放标准,但随着环境保护和污染控制力度加强,进一步降低砷的排放,甚至达到发达国家水平是不可避免的。为优化脱硫废水中砷处理效果提出以下几点建议。

(1) 加强对砷处理材料的研究。质优价廉的除砷剂研发,如化学稳定性高、高吸附率且易洗脱、对其他污染物协同去除作用;新型吸附剂材料、材料制备方法、除砷生物富集砷的影响因素的深入研究。

(2) 加强对除砷污泥重金属固定的研究。探索污泥无害化、减量化、资源化过程与其他技术间的互补协同作用,减少对环境的二次污染;优化污泥后期再利用和重金属回收技术。

(3) 加强对脱硫废水砷处理工艺参数的研究。优化物化沉淀处理工艺中砷脱除过程,挖掘其他技术如电絮凝、光催化氧化技术在实际废水中的应用潜力,意义极大;国内生物处理脱硫废水领域严重缺乏对关键工艺参数的掌握,需要大量的研究逐步形成可供设计参考的理论支持,形成成熟的工艺技术体系。

(4) 加强国内脱硫废水多种除砷技术联用和其他技术协同作用的探索。脱硫废水水质复杂,超标重金属较多,在保证经济有效的同时同步脱除脱硫废水中其他重金属杂质,如硒、汞、铅等的工艺是非常具有应用前景的;摸索与其他技术的最佳联用条件,如氧化-生物反应器。

参考文献

- [1] Ungureanu G, Santos S, Boaventura R, et al. Arsenic and antimony in water and wastewater: Overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151: 326 - 342.
- [2] Pakzadeh B, Renew J, Wos J. Coal-fired power plant flue gas desulfurization wastewater treatment[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2014, 107(12): 2417 - 2428.
- [3] Litter M I, Morgada M E, Jochen B. Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1105 - 1118.
- [4] 熊鹏, 李义连. $NaClO$ 氧化水中 $As(III)$ 的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(5): 20 - 23, 57.

- [5] 李多松,赵强,王香莲. UV/H₂O₂ 对土壤中 As(Ⅲ) 氧化效果的初步研究[J]. 环境工程,2015,33(5):166-169.
- [6] 王彦琪,刘文,王婷,等. 一步水热法制备铁掺杂钛酸纳米管对砷的同步吸附和光催化[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(4):656-668.
- [7] Fenglian F, Qi W. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 407-418.
- [8] Dash B, Mishra G, Sanjay K, et al. Arsenic removal from industrial effluents through ferric arsenate precipitation[C]// Environmental Science and Engineering, 2016.
- [9] 康英,段晋明,景传勇. 氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中 As(V) 的去除机制研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 523-529.
- [10] 刘辉利,梁美娜,朱义年,等. 氢氧化铁对砷的吸附与沉淀机理[J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 1011-1020.
- [11] 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,等. 铝盐混凝除砷影响因素及机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1386-1391.
- [12] 唐怡. 聚合硫酸铁混凝沉淀-吸附法处理含砷矿井涌水[J]. 中国金属通报, 2015(10): 45-46.
- [13] 廖亚龙,周娟,彭志强,等. 二段铁盐沉淀深度脱除高浓度含砷废水中的砷[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5261-5266.
- [14] 沈琚,唐玉朝,黄显怀,等. 钛盐混凝去除水中 As(Ⅲ) 的性能研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(8): 61-66.
- [15] Yu T, Qiu X, Hirajima T, et al. Removal mechanism of arsenate by bimetallic and trimetallic hydrocalumites depending on arsenate concentration[J]. Applied Clay Science, 2016, 134: 26-33.
- [16] 胡维,戴友芝,刘凯,等. 基于响应面的电絮凝除 As(Ⅲ) 研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(1): 47-51.
- [17] 贺瑞萍,李从茂,李昆洋,等. 铁盐电絮凝联合除砷工艺的应用[J]. 硫酸工业, 2014(6): 13-16.
- [18] Abejón R, Garea A. A bibliometric analysis of research on arsenic in drinking water during the 1992-2012 period: An outlook to treatment alternatives for arsenic removal[J]. Journal of Water Process Engineering, 2015, 6: 105-119.
- [19] Jiang J Q, Ashekuzzaman S M, Jiang A, et al. Arsenic contaminated groundwater and its treatment options in bangladesh[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2013, 10(1): 18-46.
- [20] Streat M, Hellgardt K, Newton N L R. Hydrrous ferric oxide as an adsorbent in water treatment: Part 2. Adsorption studies[J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2016, 2(3): 1-9.
- [21] 李福勤,王少雄,杨晓松,等. D201 负载 Fe(Ⅲ) 深度处理含 As(Ⅲ) 废水[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2014, 31(4): 35-37.
- [22] 王世阳,徐环昕,宁方红,等. 新型载锆树脂除 As(V) 的研究[J]. 离子交换与吸附, 2015, 31(4): 347-358.
- [23] 郭亚祺,杨洋,伍新花,等. 煅烧的水滑石同时去除水体中砷和氟[J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2485-2491.
- [24] Duan S, Ma W, Cheng Z, et al. Preparation of modified Mg/Al layered double hydroxide in saccharide system and its application to remove As(V) from glucose solution[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2015, 490(1): 250-257.
- [25] Young C, Alfantazi A, Anderson C, et al. Biological water treatment for dissolved metals and other inorganics[C]// Electrometallurgy and Environmental Hydrometallurgy, Volume 2. John Wiley & Sons, Inc, 2013: 1903-1912.
- [26] Luo Q, Tsukamoto T K, Zamzow K L, et al. Arsenic, selenium, and sulfate removal using an ethanol-enhanced sulfate-reducing bioreactor[J]. Mine Water and the Environment, 2008, 27(2): 100-108.
- [27] Altun M, Sahinkaya E, Durukan I, et al. Arsenic removal in a sulfidogenic fixed-bed column bioreactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 269(1): 31-37.
- [28] 吴敏,赵良元,冯雪. 人工湿地填料除砷效率及影响因素试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(6): 42-48.
- [29] 吴敏,林莉,赵良元,等. 垂直潜流人工湿地除砷实验研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2014, 42(7): 38-43.
- [30] Pedescoll A, Sidrach-Cardona R, Hijosa-Valsero M, et al. Design parameters affecting metals removal in horizontal constructed wetlands for domestic wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2015, 80: 92-99. ■

朗盛卫可消毒剂可杀灭多种高致病性禽流感病毒

朗盛旗下的卫可(Virkon S)产品是世界领先的兽用消毒剂之一,该消毒剂已成为全球范围内控制紧急禽流感疫情的首选。独立检测证实,此款消毒剂对多种高致病性禽流感的致命菌株病毒展现出了显著的的杀灭功效。

由国际独立检测实验室展开的研究证实,卫可在极具挑战性的农场环境中——如各种有机影响、雨水的稀释与

低温以及农场存在的多种致病微生物——可使高致病性禽流感病毒失去活性。卫可能够以 1:100 的推荐稀释比用于持续性生物防疫措施,见效快,效果好。在针对正粘病毒科(包括 H5N1 型禽流感病毒)进行的一系列测试中,卫可展现出了较好的杀灭效果,并有望对 H5N8 型病毒产生类似的功效。(赖怡蓉)